

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Luka Čalušić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

doc. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, dipl. ing.

Student:

Luka Čalušić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici doc.dr.sc. Lovorki Grgec Bermanec na stručnim savjetima i pomoći.

Također zahvaljujem tehničkom suradniku Alenu Jurišincu na pomoći u obavljanju eksperimentalnog dijela rada.

Luka Čalušić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Čalušić**

Mat. br.: 0035187091

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Međulaboratorijska usporedba rezultata umjeravanja mjerila tlaka do 1400 bar**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Interlaboratory comparison of pressure gauges calibration results up to 1400 bar**

Opis zadatka:

Uspješni rezultati sudjelovanja u međulaboratorijskim usporedbama postali su temeljni kriterij za praćenje kvalitete rada umjernih laboratorija. U ovom radu je potrebno opisati postupak i obraditi rezultate međulaboratorijske usporedbe nekoliko akreditiranih laboratorija za umjeravanje mjerila tlaka u području 0 do 1400 bar koja koriste ulje kao radni medij.

Potrebno je izraditi:

- Pregled normi i uputa za provedbu međulaboratorijskih usporedbi i obradu rezultata
- Pregled statističkih metoda za ocjenu rezultata umjeravanja
- Izbor prijenosnog etalona, mjernog područja i postupka umjeravanja
- Izbor učesnika i referentnog laboratorija, plan kruženja
- Opis mjerenja i procjenu mjerne nesigurnosti
- Analizu rezultata usporedbe

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKE OSNOVE	3
2.1. Tlak.....	3
2.2. Tlačne vage	5
2.2.1. Princip rada tlačne vage	6
2.2.2. Zahtjevi koji se postavljaju za tlačnu vagu	6
2.2.3. Vrste tlačnih vaga.....	7
2.3. Korekcije uzete u obzir kod određivanja efektivnog tlaka.....	9
2.3.1. λ Koeficijent elastične deformacije.....	10
3. VISOKI TLAKOVI.....	13
4. MEĐULABORATORIJSKE USPOREDBE I ISPITIVANJA SPOSOBNOSTI.....	15
4.1. Međulaboratorijske usporedbe	15
4.2. Ispitivanja sposobnosti	16
4.3. Opći zahtjevi za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorija HRN EN ISO/IEC 17025.....	18
4.3.1. Zahtjevi koji se odnose na upravljanje.....	18
4.3.2. Tehnički zahtjevi.....	19
4.3.3. Osiguravanje kvalitete rezultata ispitivanja i umjeravanja	20
5. MJERNA NESIGURNOST	21
5.1. Identifikacija izvora mjerne nesigurnosti	21
5.2. Procjena mjerne nesigurnosti za svaki izvor	22
5.2.1. Tip A	22
5.2.2. Tip B.....	23
5.3. Izračun sastavljene mjerne nesigurnosti za svaki izvor	23
6. POSTUPAK MJERENJA	25
7. REZULTATI MJERENJA.....	28
7.1. Laboratorij za procesna mjerenja – LPM.....	28
7.2. Laboratorij BMB	30
7.3. Laboratorij Petrokemija d.d.....	31
7.4. Laboratorij Metron Instruments d.o.o.	32
7.5. Laboratorij STSI.....	33
8. ANALIZA REZULTATA MJERENJA.....	34
8.1. Primjer računanja proširene mjerne nesigurnosti rezultata Ux prema uputama DKD-R6-1.....	35
8.2. Tablice E_n vrijednosti	36
8.3. Grafički prikaz rezultata usporedbe	39
9. ZAKLJUČAK	44

POPIS SLIKA

Slika 1. Odnosi tlakova	4
Slika 2. Dijelovi tlačne vage	5
Slika 3. Prikaz tlačne vage	6
Slika 4. Osnovni sklop klip/cilindar	7
Slika 5. Rezanje metala vodenim mlazom	13
Slika 6. Ubrizgavači goriva	14
Slika 7. Obrada namirnica visokim tlakovima	14
Slika 8. Uporaba međulaboratorijskih usporedbi	15
Slika 9. Prikaz slijedne sheme	17
Slika 10. Prikaz istodobne sheme	17
Slika 11. Zahtjevi koji se odnose na upravljanje	18
Slika 12. Tehnički zahtjevi	19
Slika 13. Mjerna linija referentnog laboratorija	25
Slika 14. Predmet umjeravanja - manometar	26
Slika 15. Dijagram umjeravanja – tip C	27
Slika 16. Odstupanje za 0 bar	39
Slika 17. Odstupanje za 200 bar	39
Slika 18. Odstupanje za 400 bar	40
Slika 19. Odstupanje za 600 bar	40
Slika 20. Odstupanje za 800 bar	41
Slika 21. Odstupanje za 1000 bar	41
Slika 22. Odstupanje za 1200 bar	42
Slika 23. Odstupanje za 1400 bar	42
Slika 24. Odstupanja svih laboratorija za sve mjerne točke	43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Postupci umjeravanja prema DKD-R 6-1	26
Tablica 2. Plan kruženja	28
Tablica 3. Rezultati mjerenja LPM	29
Tablica 4. Rezultati mjerenja BMB.....	30
Tablica 5. Rezultati mjerenja Petrokemija d.d.	31
Tablica 6. Rezultati mjerenja Metron Instruments d.o.o.	32
Tablica 7. Rezultati mjerenja STSI	33
Tablica 8. Proširena mjerna nesigurnost	35
Tablica 9. E_n vrijednosti za Laboratorij BMB.....	36
Tablica 10. E_n vrijednosti za Laboratorij Petrokemija d.d.	37
Tablica 11. E_n vrijednost za Laboratorij Metron Instruments d.o.o.	37
Tablica 12. E_n vrijednost za Laboratorij STSI	38
Tablica 13. E_n vrijednosti za sve laboratorije	38

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_0	[m ²]	površina sklopa pri tlaku 0
A_p	[m ²]	efektivna površina pri mjerenom tlaku
b	[m]	promjer klipa
c	[m]	opseg klipa
E_1	[N/mm ²]	modul elastičnosti materijala klipa
E_2	[N/mm ²]	modul elastičnosti materijala cilindra
F	[N]	sila
g	[m/s ²]	gravitacijsko ubrzanje
h	[mm]	razlika visina etalonskog i ispitivanog sklopa
m_i	[kg]	masa utega
p	[Pa]	apsolutni tlak
p_e	[Pa]	efektivni tlak
p_j	[Pa]	tlak u košuljici cilindra tlačne vage
p_v	[Pa]	potlak
p_p	[Pa]	pretlak
r	[m]	promjer cilindra
t	[°C]	temperatura sklopa
v	[m ³]	potopljeni volumen klipa
α_c	[°C]	koeficijent temperature ekspanzije cilindra
α_k	[°C ⁻¹]	koeficijent temperature ekspanzije klipa
Γ	[m]	opseg klipa
σ	[N/m]	površinska napetost radnog medija
λ	[MPa ⁻¹]	koeficijent distorzije
μ_1	[-]	Poissonov koeficijent materijala klipa
μ_2	[-]	Poissonov koeficijent materijala cilindra
ρ_a	[kg/m ³]	gustoća okolišnog zraka
ρ_{mi}	[kg/m ³]	gustoća i-tog utega
ρ_f	[kg/m ³]	gustoća radnog medija

SAŽETAK

U ovom radu prikazani su postupak i rezultati međulaboratorijske usporedbe umjeravanja mjerila tlaka te analiza rezultata usporedbe. Također su prikazani pregledi normi i uputa za provedbu međulaboratorijskih usporedbi kao i pregled statističkih metoda za ocjenu rezultata umjeravanja. Predmet umjeravanja je manometar (proizvođač WIKA) u vlasništvu laboratorija BMB s mjernim područjem od 0 do 4000 bar. Kao etalon referentnog laboratorija koristila se tlačna vaga TLVAG-08 s odgovarajućim utezima. Tlačni medij je ulje. Umjeravanje mjerila tlaka sukladno je s uputom DKD-R 6-1. Odabran je C tip umjeravanja, a tip usporedbe bio je kružni. Svaki laboratorij izvršio je mjerenja u osam dogovorenih točaka (0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400 bar). U međulaboratorijskoj usporedbi sudjelovali su sljedeći laboratoriji: Petrokemija d.d., Metron Instruments d.o.o., BMB, STSI i LPM kao referentni laboratorij. Do navedenih laboratorija došli smo pregledavajući bazu podataka hrvatskih akreditiranih laboratorija te smo izabrali one laboratorije koji su u mogućnosti vršiti usporedbe na visokim tlakovima. Ovo je ujedno bila i prva visokotlačna usporedba u praksi Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

1. UVOD

Znanost o mjerenju - *metrologija* - vjerojatno je najstarija znanost u svijetu te je znanje o tome kako se ona primjenjuje temeljna potreba u svim znanstveno utemeljenim zanimanjima.

Metrologija se bavi:

1. metodama mjerenja fizikalnih veličina
2. ostvarivanjem i održavanjem etalona fizikalnih veličina
3. razvojem i izradom mjerila (mjernih instrumenata, uređaja i mjernog pribora)
4. analizom mjernih rezultata

Ispitivanja i mjerenja bitni su faktori za funkcioniranje kakvoće u industrijskim djelatnostima. Za to je potrebna sljedivost, koja je jednako važna kao i samo mjerenje. Priznavanje metrologijske mjerodavnosti na svakoj razini lanca sljedivosti može se uspostaviti sporazumima i dogovorima o međusobnome priznavanju. Umjeravanje mjerila ključno je za osiguravanje mjerne sljedivosti. Ono se postiže direktnom usporedbom s etalonima. O umjeravanju se izdaje potvrda. Na temelju tih podataka korisnik može odlučiti je li mjerilo prikladno za primjenu.

Tri su glavna razloga za umjeravanje mjerila:

1. da se osigura da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima
2. da se odredi točnost očitavanja mjerila
3. da se utvrdi pouzdanost mjerila

Umjeravanjem mjerila moguće je dobiti sljedeće:

- rezultat umjeravanja omogućuje pridruživanje vrijednosti mjerenih veličina pokazivanjima ili određivanje ispravaka pokazivanja
- umjeravanjem se također mogu određivati i druga metrologijska svojstva kao što su na primjer djelovanje utjecajnih veličina
- rezultat umjeravanja može se zabilježiti u dokumentu koji se katkad naziva potvrdom o umjeravanju ili izvještajem o umjeravanju

Metrologija se dijeli na tri glavna područja: zakonska metrologija, znanstvena metrologija, industrijska metrologija.

1. Zakonska metrologija je dio metrologije uređen zakonom i drugim propisima s ciljem uspostave povjerenja u rezultate mjerenja u području primjene zakonitih mjerenja. Odnosi se na mjerenja, mjerne jedinice, mjerila i mjerne metode koje provode mjerodavna tijela.

2. Znanstvena metrologija je dio metrologije koji se bavi zajedničkim problemima za sva mjeriteljska pitanja bez obzira na mjerenu veličinu. Ono obuhvaća opće teoretske i praktične probleme vezane za mjerne jedinice, njihova ostvarenja i njihovo prenošenje znanstvenim metodama, probleme mjernih pogrešaka i nesigurnosti te probleme mjeriteljskih svojstava mjerila.

3. Industrijska metrologija je dio metrologije koji se bavi mjerenjima u proizvodnji i upravljanjem kakvoćom. Obuhvaća postupke umjeravanja, razdoblja umjeravanja, upravljanje mjernim procesima, mjerilima u industriji kako bi se osiguralo da ona budu u skladu sa zahtjevima za njihovu predviđenu uporabu.

2. TEORIJSKE OSNOVE

2.1. Tlak

Tlak p se definira kao normalna sila koja djeluje na jedinicu površine sustava. Za fluidne sustave, tlak koji djeluje na površinu spremnika ili površinu mjerne membrane posljedica je kumulativnog efekta djelovanja molekula koje udaraju na stijenku spremnika, ostvarujući pri tome normalnu silu na stijenku. Za ravnotežni fluid tlak je definiran jednadžbom:

$$p = \frac{dF_n}{dA} \approx \frac{F}{A}$$

pri čemu je diferencijal površine dA najmanja površina ploštine za koju su efekti fluida isti kao i u cijelome kontinuumu.

Jedinica za mjerenje tlaka spada u grupu izvedenih jedinica SI:

$$1Pa = 1 \frac{N}{m^2} = 1 \frac{kg}{m \cdot s^2}$$

Iznimno dopuštene jedinice za mjerenje tlaka izvan SI:

$$1bar = 10^5 Pa$$

$$1mmHg \approx 133.322Pa$$

Ostale često korištene jedinice za mjerenje tlaka:

$$1mbar = 100Pa$$

$$1hPa = 100Pa$$

$$1inH_2O \approx 248.6 \text{ do } 249.1Pa$$

$$1inHg = 3386.39Pa$$

$$1psi = 6894.76Pa$$

Razlikujemo tri tipa tlaka:

- Apsolutni tlak - tlak mjeren na skali koja koristi apsolutnu nulu kao referentnu vrijednost
- Pretlak/potlak - tlak kojem je tlak okoline referentna vrijednost. Ako je promatrani tlak veći od tlaka okoline (barometarski tlak), njihovu razliku zovemo pretlak, a ako je manji njihovu razliku zovemo potlakom.

Pretlak: $p_p = p - p_0$

Potlak: $p_v = p_0 - p$

gdje je: p_p - pretlak

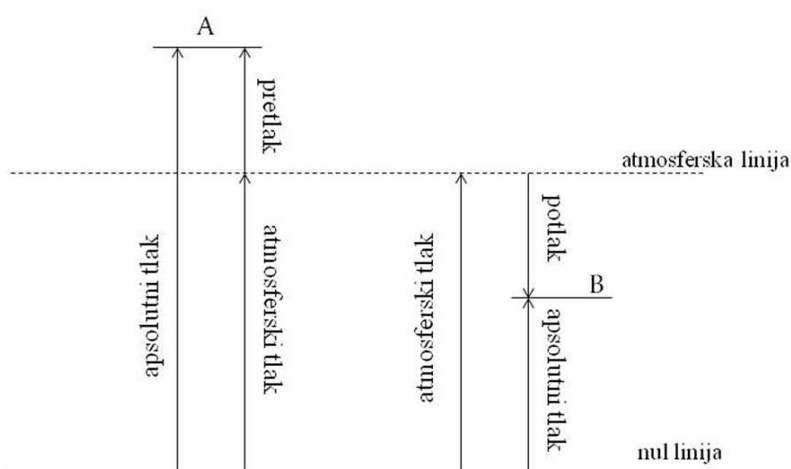
p_v - potlak

p_0 - barometarski tlak

p - apsolutni tlak

- Diferencijalni tlak - razlika između dva proizvoljna tlaka p_1 i p_2

$$\Delta p = p_1 - p_2$$



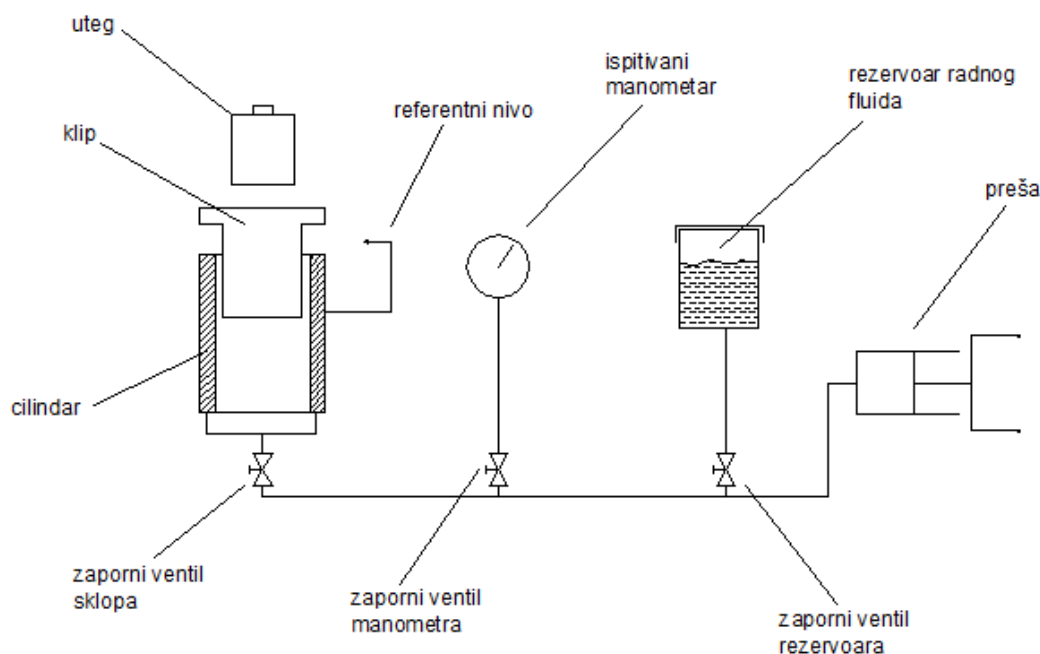
Slika 1. Odnosi tlakova

2.2. Tlačne vage

Tlačne vage predstavljaju jedno od najtočnijih mjerila tlaka. Najčešće se koriste kao etaloni za umjeravanje različitih vrsta mjerila tlaka. Razvoj tlačnih vaga bio je potaknut industrijskom primjenom parnih strojeva i potrebom za razumijevanjem termodinamičkih svojstava tekućina i plinova pri različitim tlakovima i temperaturama. Tlačne vage rade na principu promjene hidrostatskog tlaka. Sastoje se od sklopa klip/cilindar, sustava za ostvarivanje vertikalne sile na klip te sustava za generiranje tlaka u radnom fluidu.

Najvažniji dio svake tlačne vage je sklop klip/cilindar. Izrađen je s najfinijim strojarskim tolerancijama te služi za definiranje efektivne površine A_e . Pojam efektivne površine sklopa uveden je kako bi se eliminirala nepoznata sila koja je posljedica viskoznog toka fluida između klipa i cilindra. Osnovna formula za izračunavanje tlaka je:

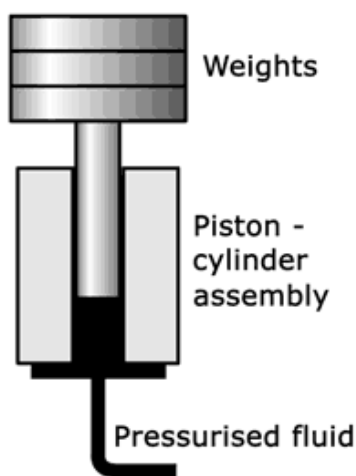
$$p = \frac{F}{A_e}$$



Slika 2. Dijelovi tlačne vage

2.2.1. Princip rada tlačne vage

Mase poznate težine se pozicioniraju na vrhu slobodnog klipa koji je također dio opterećenja. Na donji dio klipa fluidom (ulje ili plin) se generira tlak sve dok se ne razvije dovoljna sila koja će podići klip s utezima. Kada klip slobodno rotira u cilindru, vaga je u ravnoteži s nepoznatim tlakom u sustavu. U sustavu postoji i istjecanje fluida kroz procjep između klipa i cilindra. Film fluida omogućuje neophodno podmazivanje između te dvije površine, a klip rotira kako bi se eliminiralo trenje.



Slika 3. Prikaz tlačne vage

2.2.2. Zahtjevi koji se postavljaju za tlačnu vagu

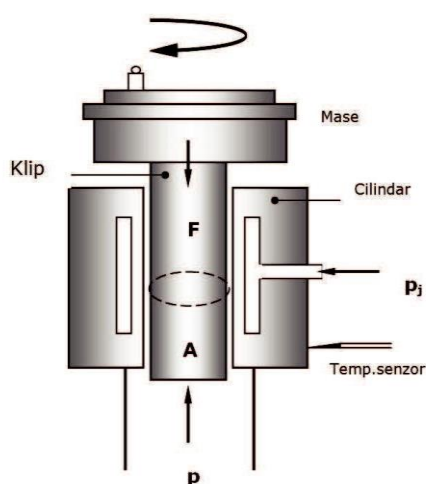
- sklop klip/cilindar mora biti izrađen od materijala koji su sposobni izdržati visoka dinamička tlačna opterećenja u elastičnom području i sa što nižim koeficijentom temperaturne ekspanzije (upotreba volframovog karbida s različitim udjelima kobalta i nikla, čelik, keramika)
- izrada i završna obrada klipa i cilindra moraju biti s tolerancijama na razini ispod μm , a zazori između njih ne smije biti veći od $0.5 - 1 \mu\text{m}$ i mora biti približno konstantan duž cijele granice
- efektivna površina pri atmosferskom tlaku mora biti približno konstantna po cijeloj dužini klipa i cilindra, a geometrija treba biti što točnija – promjeri od $1 - 50 \text{ mm}$ s odstupanjem od kružnog oblika $\pm 100 \text{ nm}$ smatraju se prihvatljivim rezultatom

- posebna pažnja treba biti posvećena brtvljenju kako bi se postigla apsolutna nepropusnost sustava, a to se postiže odgovarajućom upotrebom pomno odabranih spojnih elemenata i brtvi
- sklop klip/cilindar mora biti konstruiran na način da se izbjegne sakupljanje tekućine u gornjem dijelu cilindra
- sklop klip/cilindar mora biti opremljen s termometrom kako bi se za vrijeme mjerenja mogle očitavati temperature klipa i cilindra budući da efektivna površina značajno ovisi o temperaturi
- pozicioniranje mase na klip može biti ručno ili automatski s pomno odabranim utezima koji će koncentrirati silu na vertikalni dio klipa, a klip mora rotirati kako bi se izbjeglo trenje između klipa i cilindra za vrijeme mjerenja tlaka

2.2.3. Vrste tlačnih vaga

S obzirom na konstrukciju sklopa klip/cilindar tlačne vage se mogu podijeliti na:

1. Tlačne vage s jednostavnom konfiguracijom sklopa klip/cilindar kod kojih je $p_j = 0$
2. Tlačne vage s uvučenom konfiguracijom sklopa klip/cilindar kod kojih je $p_j = p$
3. Tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorom kod kojih je $p_j \neq p$



Slika 4. Osnovni sklop klip/cilindar

1. Tlačne vage s jednostavnom konfiguracijom sklopa klip/cilindar

Tlak koji se mjeri djeluje samo na bazu klipa. U ovoj konfiguraciji klip i cilindar su izloženi slobodnoj elastičnoj deformaciji ovisnoj o tlaku, geometriji klipa i cilindra, elastičnim konstantama klipa i cilindra i o fizikalnim svojstvima radnog fluida. Ovaj tip vaga je najrasprostranjeniji i najčešće se upotrebljava. Maksimalni tlak koji se njima mjeri je 500 MPa. Ovu izvedbu ograničava velika brzina propadanja klipa pri većim opterećenjima kao posljedica izražene deformacije cilindra i česta izmjena brtvi kod mjerenja visokih tlakova.

2. Tlačne vage s uvučenom konfiguracijom sklopa klip/cilindar

Kod ovog tipa tlačnih vaga mjereni tlak djeluje ne samo na donju bazu klipa/cilindra, već i na oplošje cilindra reducirajući time velike deformacije cilindra izloženog visokim tlakovima. Vrijednost deformacije ovisi o istim parametrima navedenim kod prethodne vrste tlačnih vaga. Ova vrsta tlačnih vaga je konstruirana kako bi se kompenzirale velike distorzije klipa i cilindra pri visokim tlakovima. Radni tlakovi im dosežu do 700 MPa. Iako su bile popularne u prošlosti, danas se manje koriste.

3. Tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorom

Kod ovih se tlačnih vagi promjenjivi tlak p_j , kojim se utječe na veličinu zazora između klipa i cilindra, kontrolira i generira zasebnim sustavom. Ova konfiguracija je izuzetno korisna za mjerenje tlakova iznad 500 MPa, ali je operativna i na srednjim tlakovima. To je omogućeno zahvaljujući pravilnom odabiru tlaka p_j kojim je moguće održavati konstantnu vrijednost zazora između klipa i cilindra.

2.3. Korekcije uzete u obzir kod određivanja efektivnog tlaka

- Korekcija površine – utjecaj temperature na temperaturno rastezanje klipa i cilindra te utjecaj tlaka na pojavu elastične deformacije.

$$A_e = A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p) \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c) \cdot (t - 20)]$$

gdje je:

A_0 - površina sklopa pri tlaku 0 i $t = 20$ °C [mm²]

λ - koeficijent elastične deformacije [MPa⁻¹]

α_k, α_c - koeficijenti temperaturne ekspanzije klipa i cilindra [°C⁻¹]

t - temperatura sklopa

- Korekcija sile – vrši se zbog uzgonskog djelovanja zraka na uteg, uzgonskog djelovanja ulja na uronjene dijelove utega, statičkog tlaka stupca fluida, površinske napetosti fluida, varijacije gravitacijskog ubrzanja i dr.

$$F = \sum_i \left[m_i g \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) \right] + g \cdot (h A_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) + \Gamma \cdot \sigma$$

gdje je:

m_i - prava masa i-tog utega postavljenog na sklop [kg]

ρ_a - gustoća zraka okoline [kg/m³]

ρ_{mi} - gustoća i-tog utega [kg/m³]

h - razlika visina etalonskog i ispitivanog sklopa [m]

v - volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida [m³]

ρ_f - gustoća radnog medija [kg/m³]

Γ - opseg klipa [m]

σ - površinska napetost radnog medija [N/m]

Jednadžba za efektivni tlak $p_e = \frac{F}{A_e}$ prelazi u realniji oblik:

$$p_e = \frac{\sum_i \left[m_i g \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) \right] + g \cdot (hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) + \Gamma \cdot \sigma}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p) \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c) \cdot (t - 20)]}$$

2.3.1. λ Koeficijent elastične deformacije

Koeficijent elastične deformacije sklopa klip/cilindar predstavlja koliko će se efektivna površina promijeniti s povećanjem tlaka. Efektivna površina se obično povećava s povećanjem tlaka zbog toga što se cilindar više deformira od klipa stoga koeficijent elastične deformacije ne smijemo zanemariti prilikom umjeravanja na visokim tlakovima.

Koeficijent elastične deformacije za sklop klip/cilindar tlačne vage uglavnom se određuje eksperimentalnom metodom gdje se uspoređuju tlakovi etalonske i ispitivane tlačne vage. Za tlačne vage s jednostavnim oblikom klipa i cilindra moguće je odrediti koeficijent elastične deformacije računskim putem koji se zasniva na teoriji elastičnosti i poznatim fizikalnim značajkama materijala od kojih je sklop izrađen.

2.3.1.1. Eksperimentalno određivanje koeficijenta elastične deformacije λ

- Direktno određivanje λ :

Ovisnost koeficijenta elastične deformacije o mjerenom tlaku za etalonsku i ispitivanu vagu dana je izrazom (1):

$$A_p = A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \quad (1)$$

gdje je A_p efektivna površina pri mjerenom tlaku, a A_0 efektivna površina kada je tlak u sustavu jednak nuli.

Efektivna površina sklopa klip/cilindar ispitivane vage koja se uspoređuje s etalonskom dana je izrazom (2):

$$A_p = \frac{\sum_i \left[m_i g \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) \right]}{p_e \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c) \cdot (t - 20)]} \quad (2)$$

Koeficijent elastične deformacije za sklop klip/cilindar može se izračunati iz vrijednosti efektivne površine koja je određena za svaku pojedinu točku n mjerenja primjenjujući modificirani izraz (1) s metodom najmanjih kvadrata prema izrazu (3):

$$\lambda = \frac{n \sum_1^n A_p \cdot p_e - n \sum_1^n A_p \cdot \sum_1^n p_e}{n \sum_1^n A_p \cdot \sum_1^n p_e^2 - \sum_1^n p_e \cdot \sum_1^n A_p \cdot p_e} \quad (3)$$

- Određivanje razlike λ između etalonske i ispitivane vage:

Prilikom određivanja razlike koeficijentata elastične deformacije kreće se od izraza (1) koji je osnova za izražavanje ovisnosti efektivnih površina etalonske i ispitivane vage o generiranom tlaku u mjernoj točki. Razlika koeficijentata elastične deformacije može se odrediti iz izraza (4):

$$R_p = R_0 + [1 + (\lambda_{et} - \lambda) \cdot p_e] \quad (4)$$

odnosno:

$$\lambda_{et} - \lambda = \frac{\frac{R_p}{R_0} - 1}{p_e} \quad (5)$$

2.3.1.2. Teorijsko određivanje koeficijenta elastične deformacije λ

Koeficijent elastične deformacije za sklop klip/cilindar kod tlačnih vaga sa jednostavnim oblikom klipa može se dobiti prema izrazu (6):

$$\lambda = \frac{1}{2E_2} \cdot \left[\frac{\left(\frac{r}{b}\right)^2 + 1}{\left(\frac{r}{b}\right)^2 - 1} + \mu_2 \right] - \frac{1}{2E_1} \cdot (1 - 3\mu_1) \quad (6)$$

gdje je:

r - promjer cilindra

b - promjer klipa

E_1 - modul elastičnosti materijala klipa

E_2 - modul elastičnosti materijala cilindra

μ_1 - Poissonov koeficijent materijala klipa

μ_2 - Poissonov koeficijent materijala cilindra

3. VISOKI TLAKOVI

Napredne tehnologije visokog tlaka često se koriste u petrokemijskim, farmaceutskim, prehrambenim industrijama te u industrijama automobila. Tlakovi korišteni u nekim suvremenim sustavima premašuju mogućnosti umjeravanja koje su ograničene na 1 GPa (10 000 bar).

U automobilske industrije primjena visokih tlakova ima važnu ulogu u proizvodnji sustava direktnog ubrizgavanja goriva koji poboljšavaju rad benzinskog i diesel motora.

U prehrambenoj industriji obrada namirnica visokim tlakovima (100 do 800 MPa) je nova i vrlo zanimljiva alternativna metoda koja dovodi do minimalnih nutritivnih promjena, promjena teksture, arome, boje obrađene namirnice. Prednosti utjecaja visokih tlakova u prehrambenoj industriji uključuju povećanu sigurnost tehnološkog procesa, manji utrošak energije, veću mikrobiološku sigurnost i kao posljedicu toga povećanu dugotrajnost kao i vrijeme skladištenja tako dobivenog proizvoda.

U farmaceutskoj industriji visoki tlakovi se koriste u procesu dinamičke visokotlačne homogenizacije koji omogućuje smanjenje čestica tekućina, koristi se u poticanju enzimskih reakcija te modificiranju proteina.

Visoki tlakovi se također koriste pri rezanju vodenim mlazom - nestandardnim postupkom obrade materijala.

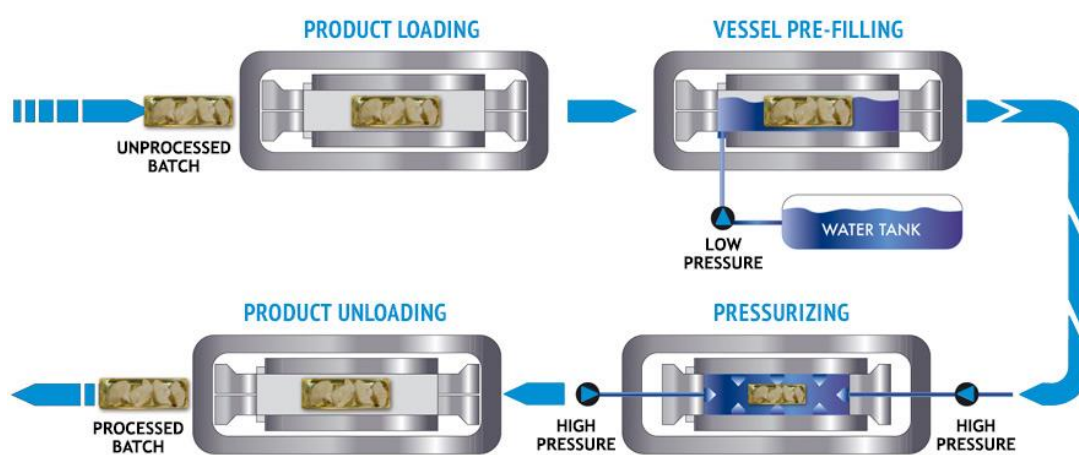
U Hrvatskoj nema većih potreba za visokim tlakom te se koriste tlakovi do 1400 bar.



Slika 5. Rezanje metala vodenim mlazom



Slika 6. Ubrizgavači goriva



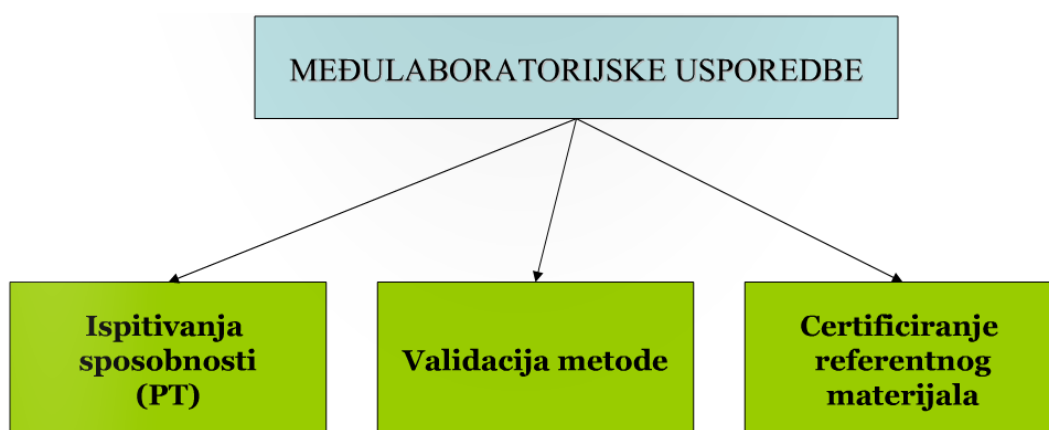
Slika 7. Obrada namirnica visokim tlakovima

4. MEĐULABORATORIJSKE USPOREDBE I ISPITIVANJA SPOSOBNOSTI

4.1. Međulaboratorijske usporedbe

Međulaboratorijske usporedbe se provode u različite svrhe i njima se mogu koristiti različita tijela za ocjenjivanje sukladnosti kao što su ispitni laboratoriji, umjerni laboratoriji, medicinski laboratoriji, inspekcijska i certifikacijska tijela za dokazivanje svoje tehničke osposobljenosti. Tijela za ocjenjivanje sukladnosti koja sudjeluju u nekoj organiziranoj međulaboratorijskoj usporedbi nazivaju se sudionicima međulaboratorijske usporedbe.

Osnovna primjena međulaboratorijskih usporedbi je ispitivanje sposobnosti sudionika. Druge važnije primjene su u svrhu validacije metode i certificiranja referentnog materijala.



Slika 8. Uporaba međulaboratorijskih usporedbi

Uobičajene primjene međulaboratorijskih usporedbi u svrhu ispitivanja sposobnosti obuhvaćaju:

- vrednovanje izvedbi sudionika za određena ispitivanja ili mjerenja
- otkrivanje problema u radu i poboljšanje rada
- utvrđivanje učinkovitosti i usporedivosti ispitnih ili mjernih metoda
- pružanje dodatnog povjerenja kupcima usluga
- usporedba metoda ili postupaka i otkrivanje razlika između laboratorija
- usporedba sposobnosti osoblja koje provodi ispitivanja ili mjerenja
- izobrazba sudionika temeljena na rezultatima provedene usporedbe
- validacija granica nesigurnosti

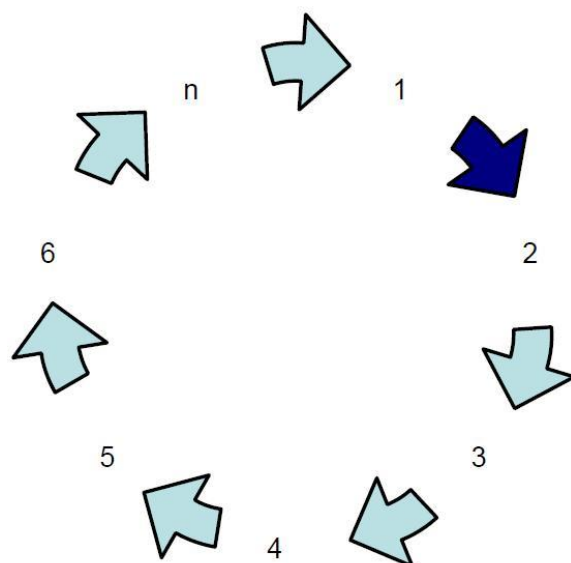
4.2. Ispitivanja sposobnosti

Sudjelovanje u ispitivanjima sposobnosti pruža sudionicima objektivni način ocjenjivanja njihove osposobljenosti i dokazivanja pouzdanosti njihovih podataka te na taj način omogućuje povjerenje u njihov rad. Cilj ispitivanja sposobnosti nije samo pružiti informaciju o uspješnosti izvedbe određene aktivnosti sudionika nego da omogući sudionicima određenu izobrazbu u području ispitivanja sposobnosti u kojem su sudjelovali te da dobivene informacije upotrijebe za poboljšanje kvalitete ispitivanja ili mjerenja.

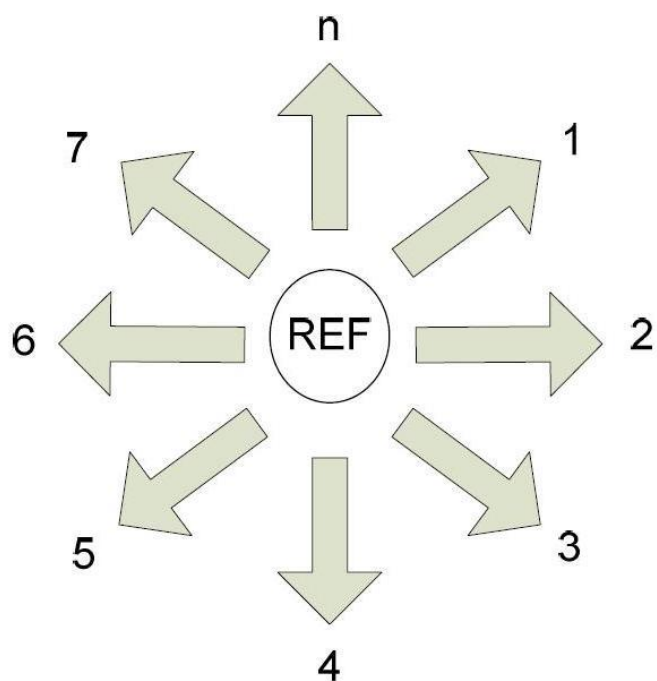
Postoje različite vrste shema ispitivanja sposobnosti koje su svrstane u nekoliko kategorija.

Prva kategorija shema ispitivanja sposobnosti dijeli ih prema raspodjeli predmeta ispitivanja sposobnosti na:

- slijedne (sekvencijalne) sheme - raspodjela predmeta ispitivanja sposobnosti je slijedna, od jednog sudionika do drugog
- istodobne (simultane) sheme - raspodjela slučajno odabranih predmeta ispitivanja sposobnosti je istovremena prema svim sudionicima



Slika 9. Prikaz slijedne sheme



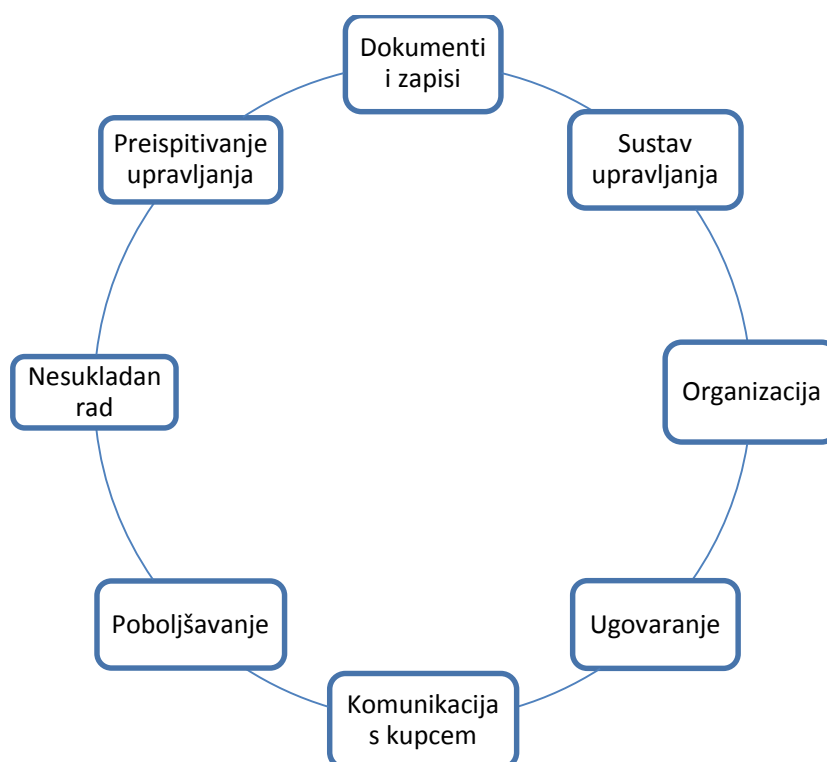
Slika 10. Prikaz istodobne sheme

4.3. Opći zahtjevi za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorija HRN EN ISO/IEC 17025

Sudjelovanjem u međulaboratorijskom ispitivanju laboratoriji moraju ispuniti zahtjeve iz norme Opći zahtjevi za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorija HRN EN ISO/IEC 17025, posebno točku 5.9 Osiguravanje kvalitete rezultata ispitivanja i umjeravanja, kako bi dokazali da su stručni i tehnički osposobljeni odnosno da su sposobni dobivati tehnički pouzdane rezultate. Ova norma se može podijeliti na dva glavna poglavlja, na zahtjeve koji se odnose na upravljanje te na tehničke zahtjeve.

4.3.1. Zahtjevi koji se odnose na upravljanje

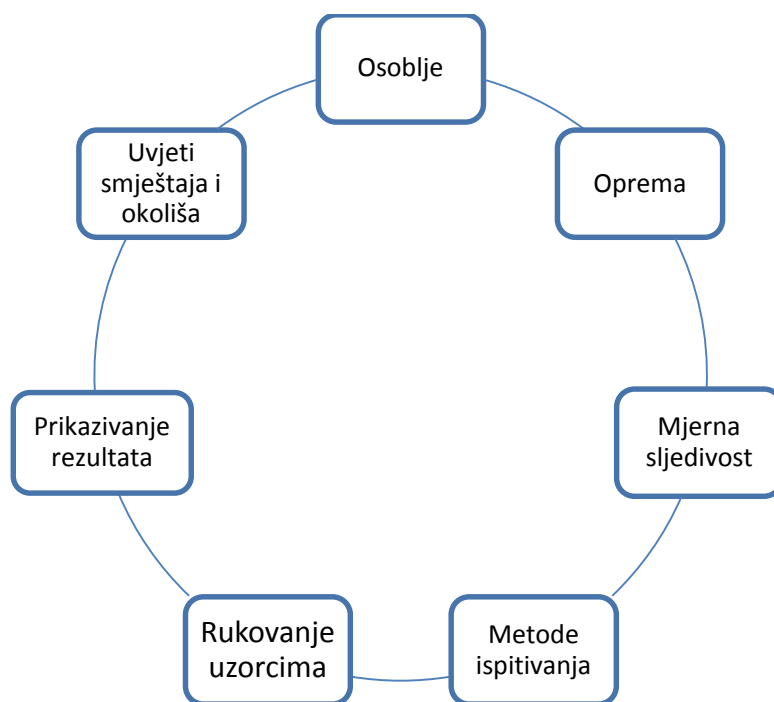
Sustav upravljanja služi za usmjeravanje laboratorija i upravljanje laboratorijem s obzirom na kvalitetu. Laboratorij mora definirati pravni status, odgovornost za rad u skladu s normom, potrebama kupaca, propisima, lokacije obuhvaćene sustavom upravljanja, odgovornosti, ovlaštenja i imenovanja ključnog osoblja.



Slika 11. Zahtjevi koji se odnose na upravljanje

4.3.2. Tehnički zahtjevi

Odnose se na validaciju i umjeravanje opreme, edukaciju osoblja, vrednovanje ispitnih metoda, procjenu mjerne nesigurnosti i kontrolu kvalitete ispitnih rezultata, sudjelovanje u međulaboratorijskim usporedbenim ispitivanjima i izdavanje izvještaja o ispitivanju. Laboratorij mora osigurati odgovarajuću infrastrukturu za ispravnu provedbu svojih ispitivanja ili umjeravanja, a uprava laboratorija mora osigurati osposobljenost svih koji rade u laboratoriju.



Slika 12. Tehnički zahtjevi

4.3.3. Osiguravanje kvalitete rezultata ispitivanja i umjeravanja

Osiguravanje kvalitete rezultata ispitivanja i umjeravanja jedan je zahtjeva norme HRN EN ISO/IEC 17025 koja je podloga za akreditaciju laboratorija i definirano je u točki 5.9 te norme:

„ 5.9.1. Laboratorij mora imati postupke za upravljanje kvalitetom koji služe za nadzor nad valjanošću poduzetih ispitivanja i umjeravanja. Dobiveni podaci moraju se zabilježiti tako da se mogu otkriti težnje, a gdje je to praktično moguće, za ocjenu rezultata moraju se primjenjivati statističke metode. Taj se nadzor mora planirati i ocjenjivati, a može uključivati, ali se ne mora ograničiti na to:

- a) Redovitu upotrebu potvrđenih referentnih materijala i/ili unutrašnjeg upravljanja kvalitetom uporabom sekundarnih referentnih materijala*
- b) Sudjelovanje u programima međulaboratorijskih usporedbi ili ispitivanja osposobljenosti*
- c) Ponovno ispitivanje zadržanih uzoraka*
- d) Međuodnos rezultata za različita svojstva predmeta ispitivanja*
- e) Sudjelovanje u međulaboratorijskim usporedbama*

5.9.2. Podaci kontrole kvalitete moraju se analizirati i kad se ustanovi da su izvan unaprijed utvrđenih kriterija, mora se poduzeti planirana radnja za ispravak problema i sprječavanje prikazivanja neispravnih rezultata.”

5. MJERNA NESIGURNOST

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja koji označava rasipanje vrijednosti što se smije razborito pripisati izmjerenoj vrijednosti. Mjerna nesigurnost govori nam koliko je mjerenje kvalitetno i s kolikom sumnjom trebamo koristiti rezultat mjerenja.

Svaki izračun mjerne nesigurnosti sastoji se od sljedećih koraka:

1. Identifikacija izvora mjerne nesigurnosti
2. Procjena mjerne nesigurnosti za svaki izvor
3. Izračun kombinirane mjerne nesigurnosti svih izvora

5.1. Identifikacija izvora mjerne nesigurnosti

Mnogi uzroci mogu naštetiti mjerenju. Oni mogu biti vidljivi ili nevidljivi. Stvarna se mjerenja nikad ne provode u idealnim uvjetima stoga treba pokušati sagledati sve što utječe na mjerenje. Pogreške i nesigurnosti prouzrokuju:

- mjerni instrumenti
- pomoćna oprema
- objekt mjerenja
- metoda mjerenja
- vještina mjeritelja
- parametri okoline
- način na koji je objekt odabran za mjerenje

5.2. Procjena mjerne nesigurnosti za svaki izvor

Nesigurnosti se procjenjuju na dva načina:

- Procjene tipa A – ako za neki podatak imamo više mjerenja pri čemu se standardna nesigurnost računa iz standardne devijacije podataka iz više mjerenja (procjene koje koriste statistiku)
- Procjene tipa B – procjene koje se baziraju na drugim podacima (prethodno iskustvo, podaci iz umjernica, specifikacija, izračuna)

5.2.1. Tip A

Za podatke dobivene statistički metodom A, standardna nesigurnost se računa iz standardne devijacije s za sve podatke dobivene mjerenjem. Standardna devijacija srednje vrijednosti je proglašena za standardnu mjernu nesigurnost (u) tipa A.

- Srednja vrijednost (aritmetička sredina):

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

- Standardna devijacija:

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}$$

- Standardna devijacija srednje vrijednosti

$$s(\bar{q}) = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (q_k - \bar{q})^2}{n(n-1)}} \quad u = s(\bar{q})$$

5.2.2. Tip B

U slučaju da mjernu nesigurnost moramo računati metodom B, tada nam je poznat samo interval nesigurnosti (tolerancija, granična pogreška) u kojem će se nalaziti prava vrijednost. Razdiobe koje se koriste pri izračunu mjerne nesigurnosti tipa B:

- Pravokutna:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

- Trokutasta:

$$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

gdje je a poluinterval nesigurnosti.

5.3. Izračun sastavljene mjerne nesigurnosti za svaki izvor

Prije računanja sastavljene mjerne nesigurnosti potrebno je podatke iz svih izvora svesti na istu razinu pouzdanosti, tj. na standardnu nesigurnost u . Ako je procjena mjerene izlazne veličine y , dana preko funkcijske zavisnosti o procjenama ulaznih veličina x_i :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$$

onda je standardna nesigurnost pridružena procjeni y izlazne veličine dana izrazom:

$$u(y) = \sqrt{\sum_i (C_i \cdot u(x_i))^2} \quad , \quad C_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}$$

gdje je C_i koeficijent osjetljivosti koji opisuje u kojoj mjeri procjena ulazne veličine x_i utječe na procjenu izlazne veličine y .

U nekim komercijalnim, industrijskim i upravljačkim primjenama ili kad se odnosi na zdravlje i zaštitu, radi se s **proširenom mjernom nesigurnošću** koja se dobije tako da se sastavljena mjerna nesigurnost pomnoži s faktorom prekrivanja (najčešće $k=2$):

$$U(y) = k \cdot u(y)$$

Tada se rezultat mjerenja iskazuje kao:

$$Y = y \pm U(y)$$

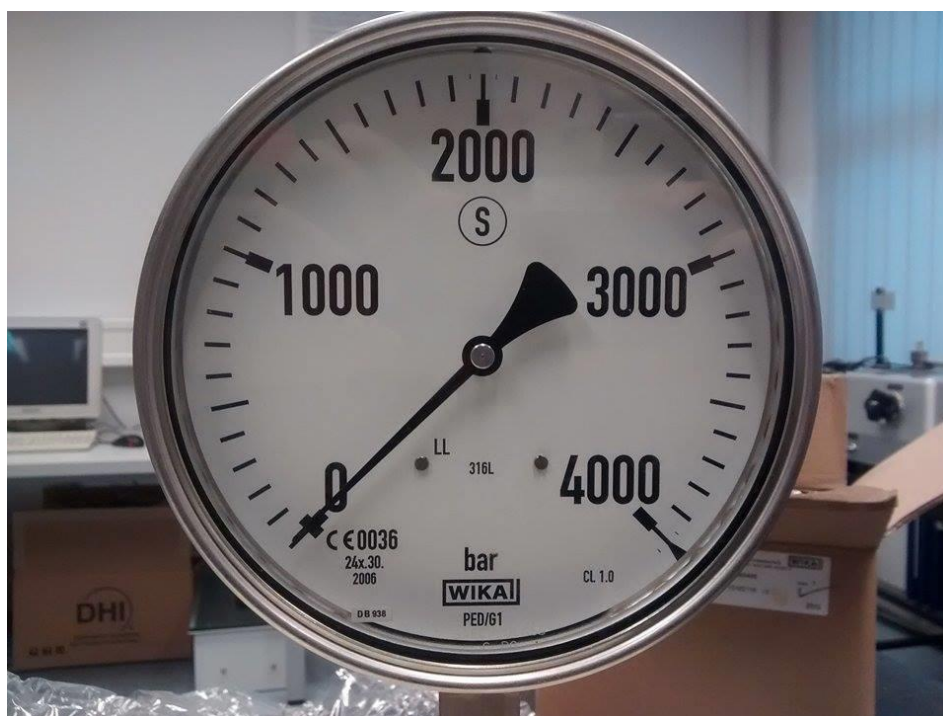
.

6. POSTUPAK MJERENJA

Referentni laboratorij u ovoj međulaboratorijskoj usporedbi bio je Laboratorij za procesna mjerenja (LPM) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Postupak mjerenja provodio se prema uputama DKD-R6-1. Odabran je C tip umjeravanja. Kao etalon odabrana je tlačna vaga TLVAG 08 s uljem kao tlačni medij. Predmet umjeravanja je manometar (proizvođač WIKA) u mjernom području od 0 do 4000 bar. Shema ispitivanja sposobnosti je slijedna. Svaki laboratorij izvršio je mjerenja u osam dogovorenih točaka (0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400 bar).



Slika 13. Mjerna linija referentnog laboratorija

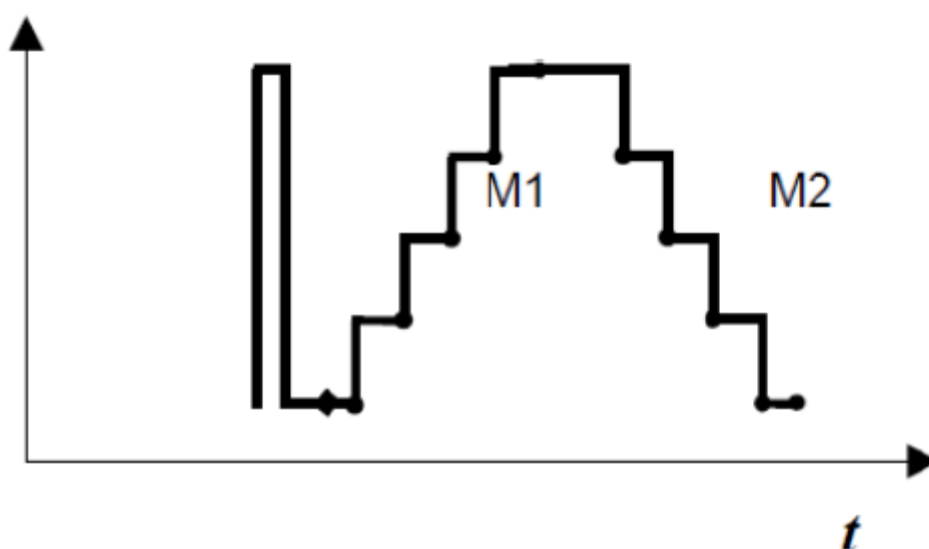


Slika 14. Predmet umjeravanja - manometar

Potrebno je zabilježiti uvjete okoline u kojoj se provodi mjerenje (temperatura, tlak, vlažnost). Umjeravanje se smije provoditi tek kada temperatura okoline i uređaja bude u rasponu od $\pm 1^\circ\text{C}$. Referentni laboratorij koristio je C tip umjeravanja kod kojeg se mjerenja izvode s jednim predopterećenjem, jednom uzlaznom i jednom silaznom serijom.

Tip umjeravanja	Razred točnosti	Broj mjernih točaka	Broj predopterećenja	Promjena opterećenja + vrijeme čekanja (sec)	Vrijeme zastoja u konačnoj vrijednosti mjernog područja (min)	Broj mjernih redova	
						uzlazno	silazno
A	< 0,1	9	3	> 30	2	2	2
B	0,1 ... 0,6	9	2	> 30	2	2	1
C	> 0,6	5	1	> 30	2	1	1

Tablica 1. Postupci umjeravanja prema DKD-R 6-1



Slika 15. Dijagram umjeravanja – tip C

Na slici 15. se vidi da se kod postupka umjeravanja tipom C mjerilo prvo optereti do maksimalnog opterećenja, zatim se rastereti na nulte postavke bez ponavljanja. Potom se odaberu točke umjeravanja te se po tim točkama stupnjevano kreće do maksimalne vrijednosti ($M1$). Zatim se ide silaznim putem po tim istim točkama ($M2$), a kada se vratimo na nulte postavke, postupak je završen.

7. REZULTATI MJERENJA

Plan kruženja:

Redni broj	Laboratorij	Datum mjerenja
1	LPM	12.11.2014.
2	BMB	19.11.2014
3	STSI	19.12.2014.
4	Petrokemija d.d.	22.12.2014.
5	Metron Instruments d.o.o.	27.01.2015.
6	LPM	29.01.2015.

Tablica 2. Plan kruženja

U nastavku su prikazani rezultati mjerenja pojedinih laboratorija.

7.1. Laboratorij za procesna mjerenja – LPM

Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka:

- Vrsta mjerila: Pretvornik tlaka s indikacijom
- Mjerno područje: 0 do 4000 bar
- Razred točnosti: 1,00%
- Dopusšteno odstupanje: 40 bar
- Podjela skale: 100 bar
- Jedinica tlaka: bar

Podaci o etalonu:

- Naziv etalona: Tlačna vaga „Budenberg“
- Interna oznaka: TLVAG-08
- Nesigurnost etalona: $1,1 \cdot 10^{-4} \cdot p$
- Sljedivost: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Umjerna procedura:

Instrument je umjeren pomoću etalonskih mjernih sustava Laboratorija za procesna mjerenja. Korištena je interna procedura umjeravanja metodom usporedbe CPTL-02 temeljena na DKD-R6-1 (tip B) proceduri.

Uvjeti umjeravanja:

- Temperatura okoline: 22,2 °C
- Tlak okoline: 1019 mbar
- Rel.vlažnost zraka: 34 %
- Tlačni medij: ulje
- Pozicija ispitivanog mjerila: vertikalna

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost M bar	Odstupanje $M-p_e$ bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
		Uzlazno bar	Silazno bar				
1	0	0	0	0	0	0	23,09
2	200,01	200	200	200	-0,01	0	23,09
3	400,04	390	400	395	-5,04	10	23,81
4	600,07	590	600	595	-5,07	10	23,81
5	800,11	790	800	795	-5,11	10	23,81
6	1000,14	990	990	990	-10,14	0	23,10
7	1200,18	1180	1190	1185	-15,18	10	23,81
8	1400,21	1390	1390	1390	-10,21	0	23,10

Tablica 3. Rezultati mjerenja LPM

7.2. Laboratorij BMB

Uvjeti umjeravanja:

- Temperatura zraka: 21,9 °C
- Rel.vlažnost zraka: 60,5 %
- Tlak zraka: 997,2 hPa
- Tlačni medij: ulje
- Položaj tijekom umjeravanja: vertikalno

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost M bar	Odstupanje $M-p_e$ bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
		Uzlazno bar	Silazno bar				
1	0,1	0	0	0	0	0	12
2	199,6	195	200	198	-2	5	13,4
3	399,2	390	400	395	-4	10	19,5
4	598,8	590	600	595	-4	10	14,3
5	798,8	790	795	793	-6	5	16,1
6	998,5	990	995	993	-6	5	13,4
7	1198,3	1180	1190	1185	-3	10	16,8
8	1398,2	1385	1395	1390	-8	10	14,3

Tablica 4. Rezultati mjerenja BMB

7.3. Laboratorij Petrokemija d.d.

Podaci o etalonu:

- Proizvođač: Budenberg
- Mjerno područje: 20-1200 bar
- Mjerna nesigurnost: $5 \cdot 10^{-4} \cdot p_e$

Uvjeti umjeravanja:

- Temperatura zraka: 23,15 °C
- Rel.vlažnost zraka: 28,3 %
- Tlak zraka: 1013,3 mbar
- Tlačni medij: mineralno ulje
- Položaj tijekom umjeravanja: vertikalno

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost M bar	Odstupanje M- p_e bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
		Uzlazno bar	Silazno bar				
1	0,1	0	0	0	0	0	23,094
2	199,9859	200	200	200	0	0	23,094
3	399,9636	400	400	400	0	0	23,095
4	599,9534	600	600	600	0	0	23,1
5	799,9433	780	800	790	-9,9	20	25,823
6	999,9311	980	1000	990	-9,9	20	25,025
7	1199,9209	1160	1160	1160	-39,9	0	23,102

Tablica 5. Rezultati mjerenja Petrokemija d.d.

7.4. Laboratorij Metron Instruments d.o.o.

Podaci o etalonu:

- Naziv: pretvornik tlaka s digitalnim izlazom RS232
- Mjerno područje: 0-1000 bar
- Mjerna nesigurnost: 0,5 bar

Uvjeti umjeravanja:

- Temperatura zraka: 22,6 °C
- Tlak zraka: 1002 mbar
- Tlačni medij: voda
- Položaj tijekom umjeravanja: vertikalno

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost M bar	Odstupanje $M-p_e$ bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
		Uzlazno bar	Silazno bar				
1	0	0	0	0	0	0	23,1
2	200	207,1	208,3	207,7	-7,7	1,2	23,1
3	400	408,3	411,6	410	-10	3,3	23,2
4	600	611,2	613,0	612,1	-12,1	1,8	23,1
5	800	817	817	817	-17	0	23,1
6	1000	1004,7	1020,7	1017,7	-17,7	6	23,4

Tablica 6. Rezultati mjerenja Metron Instruments d.o.o.

7.5. Laboratorij STSI

Podaci o etalonu:

- Naziv: tlačna vaga CPB 5000
- Mjerno područje: 2-1000 bar
- Mjerna nesigurnost: $0,00015 \cdot p_e$

Uvjeti umjeravanja:

- Temperatura zraka: 26,4°C
- Rel.vlažnost zraka: 67 %

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost M bar	Odstupanje M- p_e bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
		Uzlazno bar	Silazno bar				
1	0	0	0	0	0	0	23,094
2	199,99	190	190	190	-9,993	0	23,094
3	399,99	390	390	390	-9,986	0	23,094
4	599,98	590	590	590	-9,979	0	23,094
5	799,97	780	780	780	-19,973	0	23,094
6	999,97	980	980	980	-19,967	0	23,095

Tablica 7. Rezultati mjerenja STSI

8. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

Rezultati mjerenja biti će prikazani pomoću faktora slaganja E_n kako bi se na objektivan način mogli utvrditi jesu li rezultati laboratorija u skladu s referentnom vrijednošću. Vrijednost E_n pokazuje koliko su blizu rezultati laboratorija u odnosu na referentnu vrijednost uzimajući u obzir nesigurnost rezultata i referentne vrijednosti. Izračun E_n vrijednosti je metoda preračunavanja rezultata mjerenja u standardnu formu na temelju koje možemo ocijeniti uspješnost mjerenja.

Formula za računanje faktora slaganja E_n :

$$E_n = \frac{(x - X)}{\sqrt{(U_x^2 + U_X^2)}}$$

gdje je:

x – rezultat laboratorija

X – referentna vrijednost

U_x – proširena nesigurnost rezultata laboratorija

U_X – proširena nesigurnost referentne vrijednosti

Interpretacija E_n vrijednosti:

- $|E_n| \leq 1$ zadovoljavajuće
- $|E_n| > 1$ nezadovoljavajuće

8.1. Primjer računanja proširene mjerne nesigurnosti rezultata U_x prema uputama DKD-R6-1

Tablica 8. Proširena mjerna nesigurnost

$p = 1200,18 \text{ bar}$			
Utjecajna veličina	Podaci [bar]	Faktor	u^2 [bar ²]
Etalon	0,13	0,5	0,0044
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,026	0,58	0,00023
Razlučljivost	20	0,58	133,3
Histereza	10	0,29	8,3
			$\Sigma u^2 = 141,7$
			$U = 23,81$

Etalon:

- Nesigurnost etalona: $1,1 \cdot 10^{-4} \cdot p \rightarrow 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1200,177 = 0,13 \text{ bar}$
- Faktor: 0,5

$$u^2 = (0,13 \cdot 0,5)^2 = 0,0044 \text{ bar}^2$$

Etalon pod uvjetima ispitivanja:

- Faktor: 0,57737

$$u^2 = (1/5 \cdot 0,13 \cdot 0,58)^2 = 0,00023 \text{ bar}^2$$

Razlučljivost:

- Podjela skale: 100 bar
- Iznos razlučljivosti: $1/5 \cdot 100 = 20 \text{ bar}$
- Faktor: 0,58

$$u^2 = (1/5 \cdot 100 \cdot 0,58)^2 = 133,3 \text{ bar}^2$$

Histereza:

- Faktor: 0,29
- Iznos histereze: 10 bar

$$u^2 = (10 \cdot 0,29)^2 = 8,3 \text{ bar}^2$$

$$\Sigma u^2 = 141,7 \text{ bar}^2$$

$$U = k \cdot u = 2 \cdot 11,9 = 23,81 \text{ bar}$$

8.2. Tablice E_n vrijednosti

Tlak p_e [bar]	Odstupanje		Mjerna nesigurnost		E_n vrijednost
	$\Delta p_{(BMB)}$ [bar]	$\Delta p_{(LPM)}$ [bar]	$U_{(BMB)}$ [bar]	$U_{(LPM)}$ [bar]	
0	0	0	12	23,09	0
200	-2	0	13,4	23,09	0,07
400	-4	-5	19,5	23,81	0,03
600	-4	-5,1	14,3	23,81	0,04
800	-6	-5,1	16,1	23,81	0,03
1000	-6	-10,1	13,4	23,10	0,15
1200	-3	-15,2	16,8	23,81	0,42
1400	-8	-10,2	14,3	23,10	0,08

Tablica 9. E_n vrijednosti za Laboratorij BMB

Tlak p_e [bar]	Odstupanje		Mjerna nesigurnost		E_n vrijednost
	$\Delta p_{(PTK)}$ [bar]	$\Delta p_{(LPM)}$ [bar]	$U_{(PTK)}$ [bar]	$U_{(LPM)}$ [bar]	
0	0	0	6	23,09	0
200	0	0	10	23,09	0
400	0	-5	19,999	23,81	0,16
600	0	-5,1	30	23,81	0,13
800	-10	-5,1	39,998	23,81	0,11
1000	-10	-10,1	49,997	23,10	0,002
1200	-40	-15,2	59,996	23,81	0,38

Tablica 10. E_n vrijednosti za Laboratorij Petrokemija d.d.

Tlak p_e [bar]	Odstupanje		Mjerna nesigurnost		E_n vrijednost
	$\Delta p_{(MI)}$ [bar]	$\Delta p_{(LPM)}$ [bar]	$U_{(MI)}$ [bar]	$U_{(LPM)}$ [bar]	
0	0	0	23,1	23,09	0
200	-7,7	0	23,1	23,09	0,24
400	-10	-5	23,2	23,81	0,15
600	-12,1	-5,1	23,1	23,81	0,21
800	-17	-5,1	23,1	23,81	0,36
1000	-17,7	-10,1	23,4	23,10	0,23

Tablica 11. E_n vrijednost za Laboratorij Metron Instruments d.o.o.

Tlak p_e [bar]	Odstupanje		Mjerna nesigurnost		E_n vrijednost
	$\Delta p_{(STSI)}$ [bar]	$\Delta p_{(LPM)}$ [bar]	$U_{(STSI)}$ [bar]	$U_{(LPM)}$ [bar]	
0	0	0	23,094	23,09	0
200	-10	0	23,094	23,09	0,31
400	-10	-5	23,094	23,81	0,15
600	-10	-5,1	23,094	23,81	0,15
800	-20	-5,1	23,094	23,81	0,45
1000	-20	-10,1	23,095	23,10	0,30

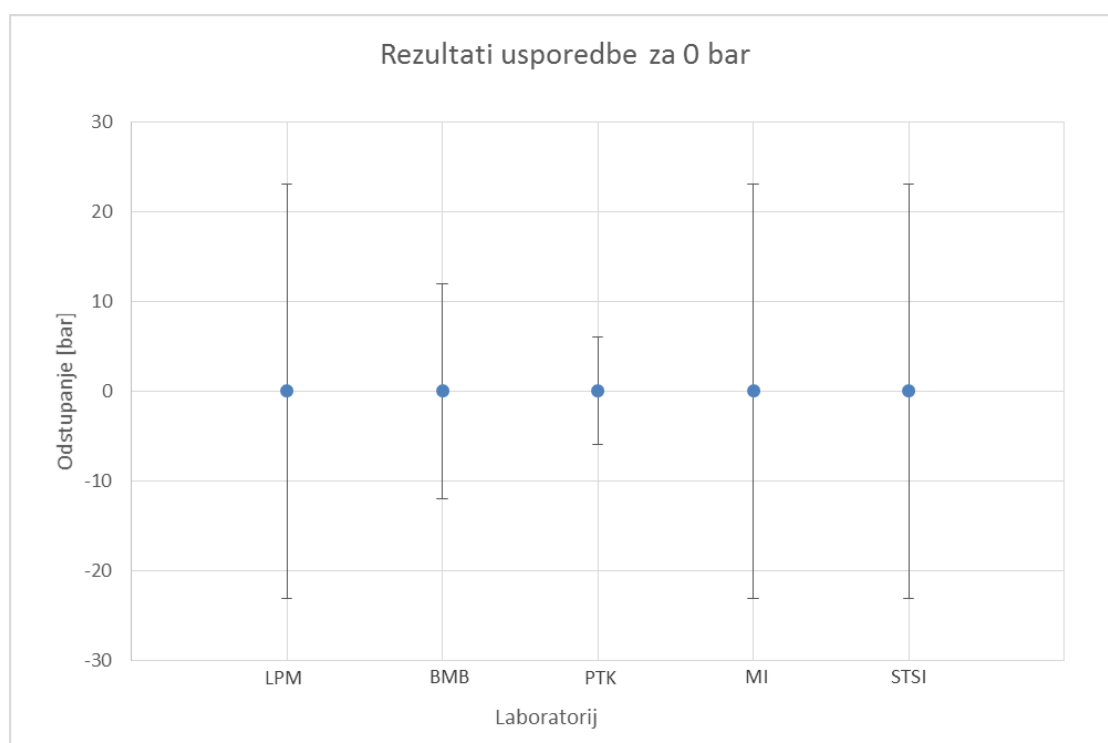
Tablica 12. E_n vrijednost za Laboratorij STSI

Tlak [bar]	$E_{n(BMB)}$	$E_{n(PTK)}$	$E_{n(MI)}$	$E_{n(STSI)}$
0	0	0	0	0
200	0,07	0	0,24	0,31
400	0,03	0,16	0,15	0,15
600	0,04	0,13	0,21	0,15
800	0,03	0,11	0,36	0,45
1000	0,15	0,002	0,23	0,30
1200	0,42	0,38	/	/
1400	0,08	/	/	/

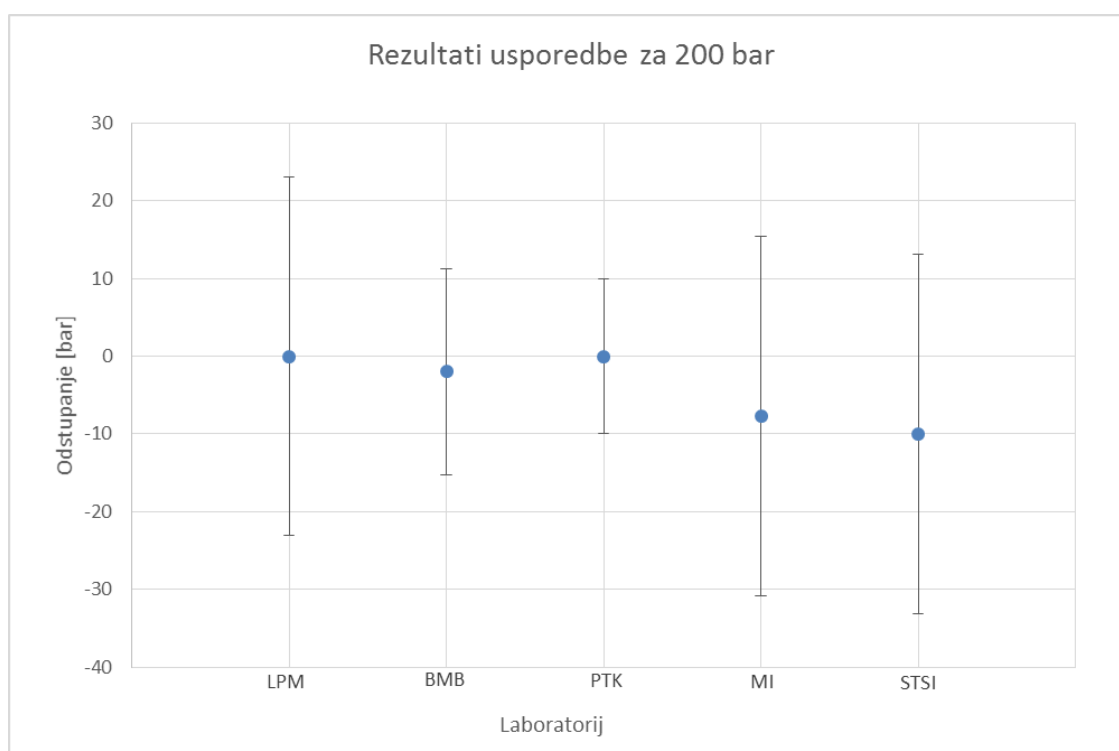
Tablica 13. E_n vrijednosti za sve laboratorije

Vrijednosti faktora slaganja E_n su zadovoljavajuće za sve mjerne točke svih laboratorija.

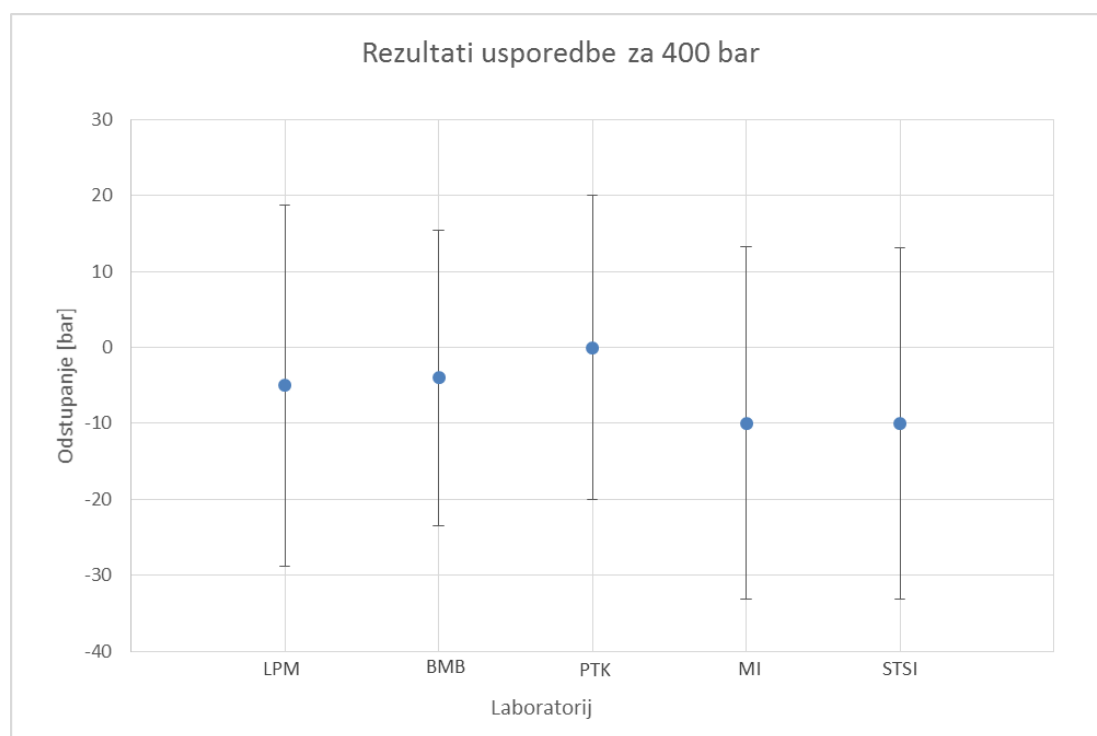
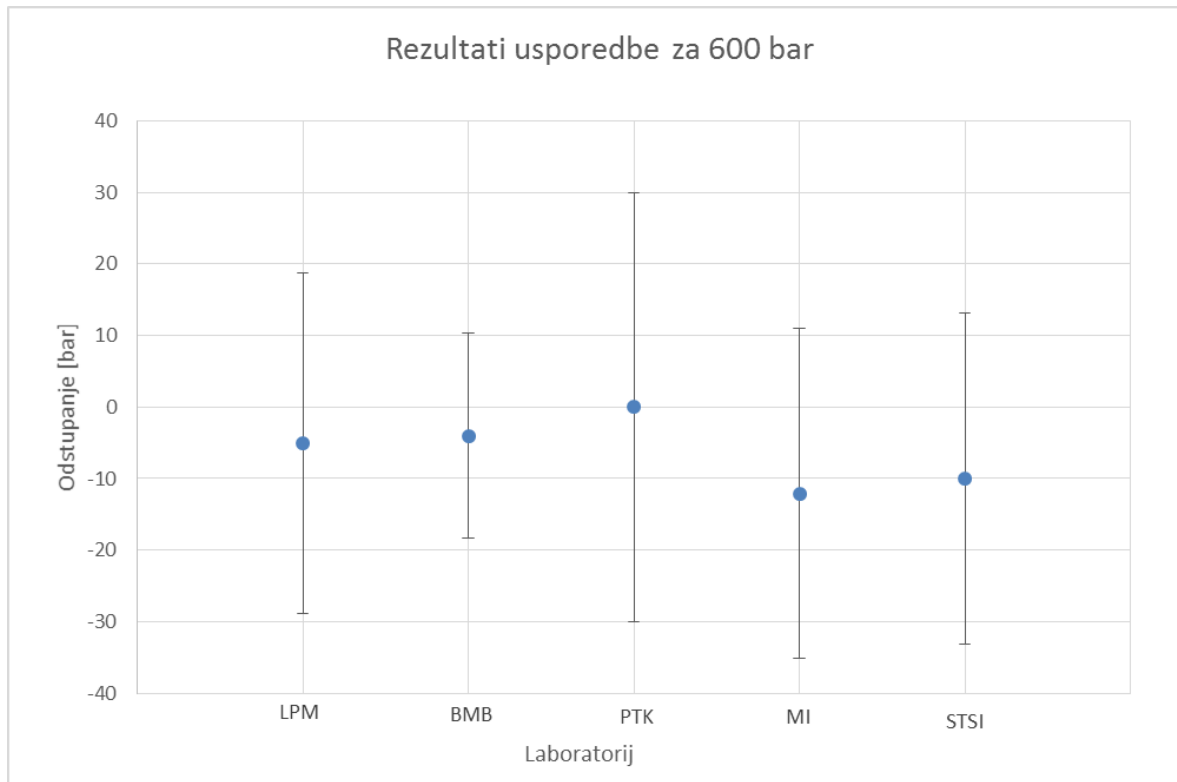
8.3. Grafički prikaz rezultata usporedbe

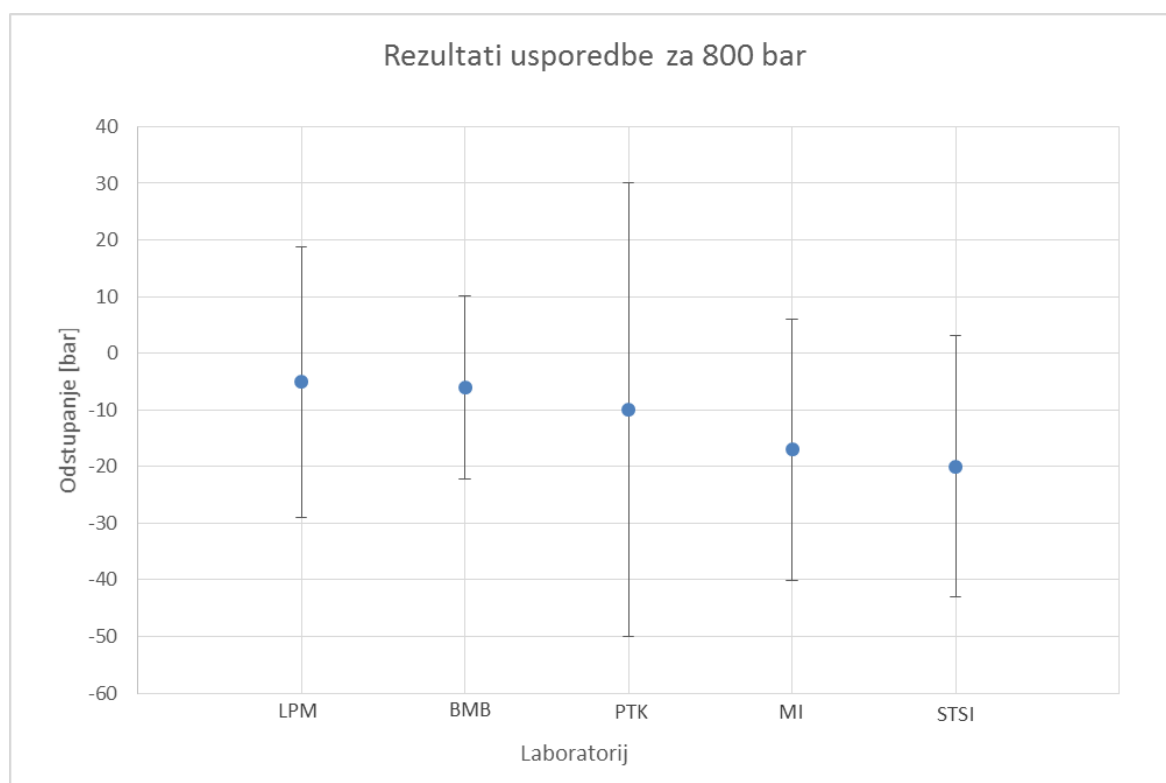


Slika 16. Odstupanje za 0 bar

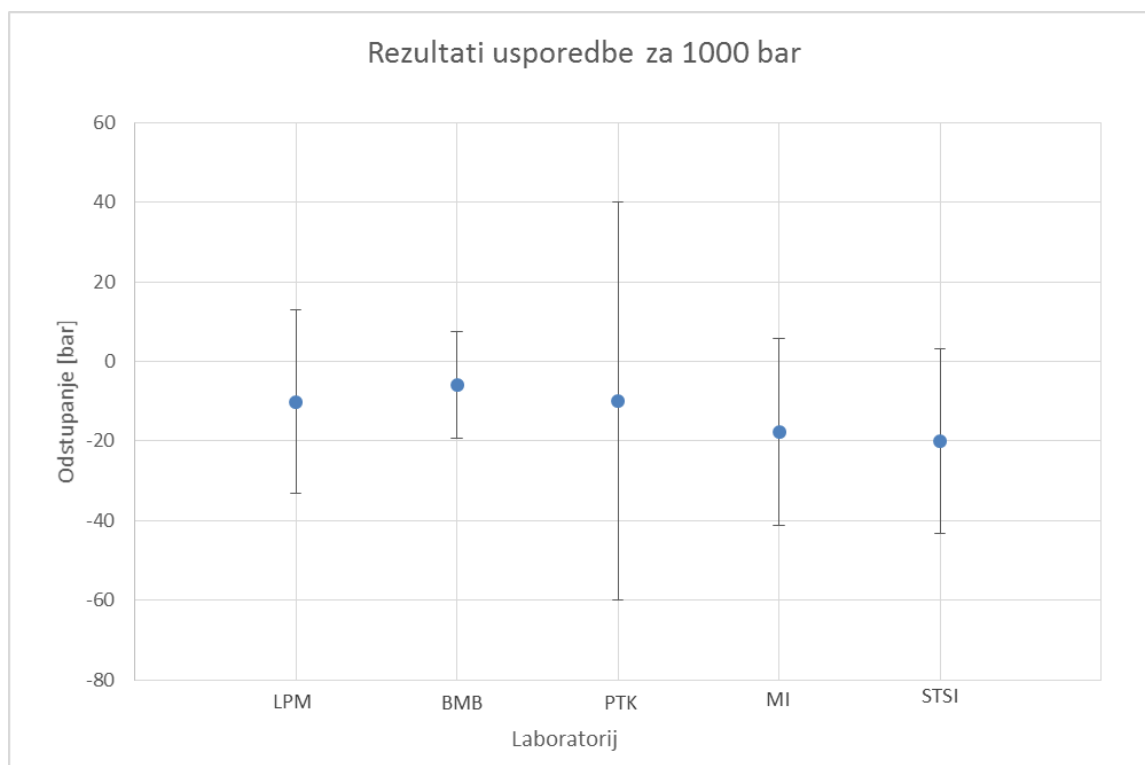


Slika 17. Odstupanje za 200 bar

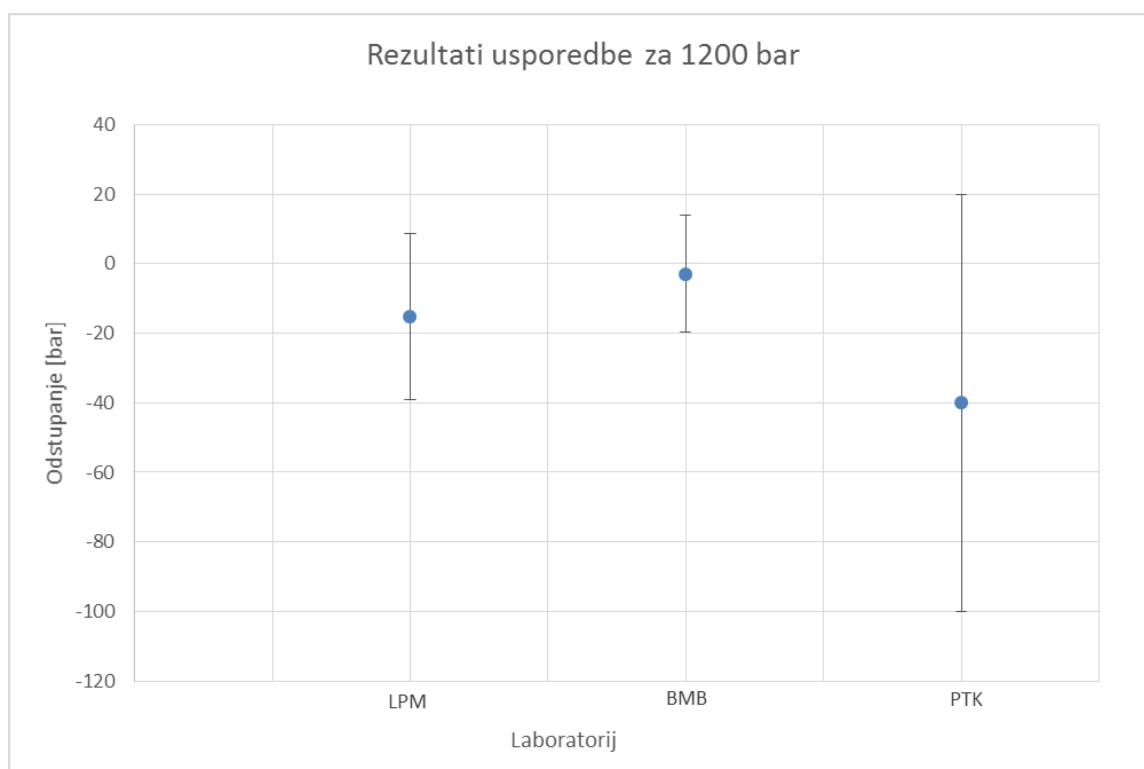
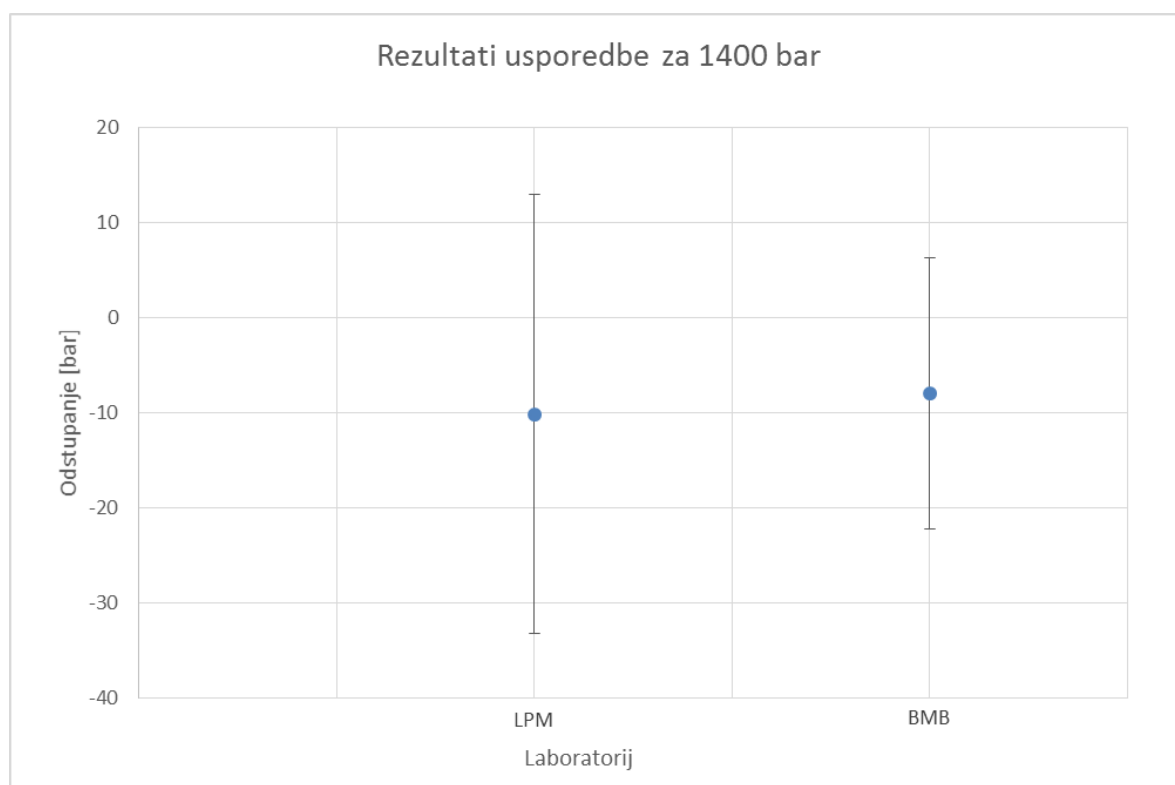
**Slika 18. Odstupanje za 400 bar****Slika 19. Odstupanje za 600 bar**

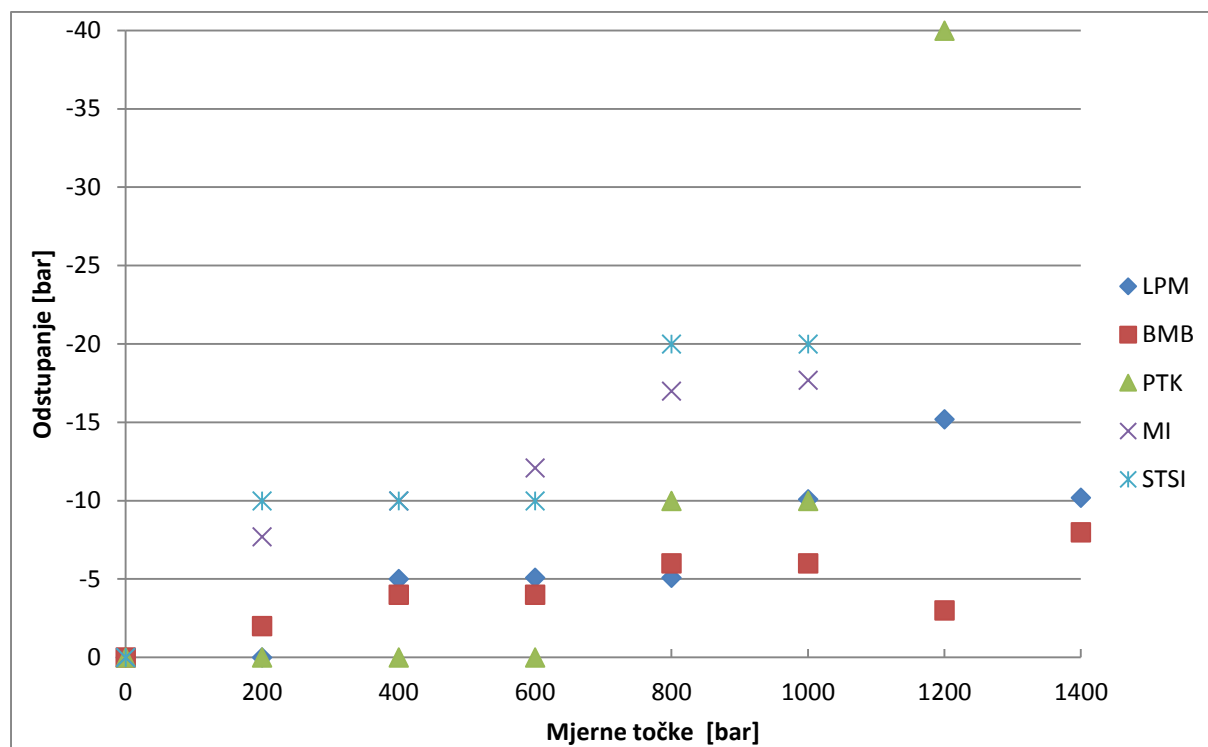


Slika 20. Odstupanje za 800 bar



Slika 21. Odstupanje za 1000 bar

**Slika 22. Odstupanje za 1200 bar****Slika 23. Odstupanje za 1400 bar**



Slika 24. Odstupanja svih laboratorija za sve mjerne točke

9. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je prikazati postupak umjeravanja mjerila tlaka po preporuci smjernica DKD-R6-1 Guideline (Calibration of Pressure Gauges) te prikazati rezultate i analizu dobivenih rezultata. U radu je također prikazan pregled normi i uputa za provedbu međulaboratorijskih usporedbi kao i pregled statističkih metoda za ocjenu rezultata umjeravanja. Smjernice DKD opisuju tehničke i organizacijske procese koji poslužuju umjernim laboratorijima kao model za postavljanje internih procedura i propisa.

U sklopu rada provedeno je međulaboratorijsko umjeravanje mjerila tlaka do 1400 bar u kojem je sudjelovalo pet laboratorija. Referentni laboratorij bio je Laboratorij za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a ostali laboratoriji su: Petrokemija d.d., Metron Instruments d.o.o., BMB, STSI. Do navedenih laboratorija došli smo pregledavajući bazu podataka hrvatskih akreditiranih laboratorija te smo izabrali one laboratorije koji su u mogućnosti vršiti usporedbe na visokim tlakovima. Ovo je ujedno bila i prva visokotlačna usporedba u praksi Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Korišten je C tip procedure umjeravanja, a tip usporedbe bio je kružni. U radu je prikazan opis mjerenja i dan je primjer računanja mjerne nesigurnosti. Dobiveni rezultati obrađeni su u računalnom programu Excel.

Analizom mjernih rezultata iz svih laboratorija utvrđeno je da su svi rezultati zadovoljavajući te da su se svi laboratoriji držali navedenih smjernica.

LITERATURA

- [1] Vuković, M.: Metrologija ukratko, DZNM, Zagreb, 2000.
- [2] Molnar M.: Mjeriteljstvo ukratko, DZNM, Zagreb, 2010.
- [3] Zvizdić, D., Grgec Bermanec, L.: Predavanja iz kolegija toplinska i procesna mjerenja, FSB-LPM, 2011.
- [4] Zvizdić, D., Grgec Bermanec, L.: Vježbe iz kolegija toplinska i procesna mjerenja, FSB-LPM, 2011.
- [5] Mudronja V., Runje B.: Predavanja iz kolegija Mjeriteljstvo, Laboratorij za precizna mjerenja dužine (LFSB), 2013.
- [6] Galović A.: Termodinamika 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [7] DKD-R-6-1, Guideline (Calibration of Pressure Gauges), Edition 01/2003
- [8] Singer S.: Predavanja iz matematike 3, Vjerojatnost i statistika, Zagreb, 2013.
- [9] EAL-P7, EAL Interlaboratory Comparisons, Edition 1, 1996.
- [10] EA-4/0,2 Izražavanje mjerne nesigurnosti pri umjeravanju, DZM, Zagreb, 2008.
- [11] EA-2/10, EA policy for participation in National and International Proficiency testing Activities
- [12] EA-2/03, EA međulaboratorijske usporedbe, Zagreb, 2000.
- [13] EA-2/07, Strategija EAL-a za postizanje usporedivosti rezultata u umjeravanju i ispitivanju, Zagreb, 2000.
- [14] Pavlović, B.: Razvoj etalonskog mjernog sustava za male protoke plina, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2000.
- [15] EURAMET/cg-17/v.01 Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers, July 2007.